

# 组合桩地基土水平抗力系数的比例系数 $m$ 的计算方法

黄晓亮<sup>1</sup>, 岳建伟<sup>1,2</sup>, 李连东<sup>1</sup>, 孙新生<sup>1</sup>

(1. 河南大学土木建筑学院, 河南 开封 475001; 2. 河南大学材料与结构研究所, 河南 开封 475001)

**摘要:** 为了提高软土的承载力, 组合桩已在工程中被应用。组合桩为预制混凝土桩插入水泥搅拌桩中而形成的新桩, 作为一种新型的桩, 虽然在实际工程中得到应用, 且试桩检测承载力高于设计值, 而关于该组合桩微观受力特性的研究较少, 该桩的理论还很不完善。其组合桩地基土水平抗力系数的比例系数  $m$  如何确定, 规范没有相应的规定和说明。为了探讨组合桩的水平承载特性, 通过对 3 根组合桩的水平承载力载荷试验研究和计算分析, 探究组合桩地基土水平抗力系数的比例系数  $m$  的计算方法。试验表明应取水平承载力设计值和与之对应的变形来计算该组合桩的  $m$  值; 计算时组合桩的抗弯刚度  $EI$  取芯桩和搅拌桩的代数和; 组合桩的  $m$  值与《建筑桩基技术规范》中查到的对应的灌注桩的  $m$  值比较接近。

**关键词:** 组合桩;  $m$  法; 水平抗力

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)S2-0192-05

作者简介: 黄晓亮(1986-), 男, 河南省洛阳人, 硕士研究生, 主要从事地基处理等岩土工程研究工作。E-mail: hxlhenu@163.com。

## Calculation method for horizontal resistance coefficient of foundation soil with composite piles

HUANG Xiao-liang<sup>1</sup>, YUE Jian-wei<sup>1,2</sup>, LI Lian-dong<sup>1</sup>, SUN Xin-sheng<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Henan University, Kaifeng 475001, China; 2. Research Institute of Material and Structural Engineering, Henan University, Kaifeng 475001, China)

**Abstract:** In order to improve the bearing capacity of soft soil, a new-style composite pile has been used in the project. The new-style composite pile is obtained by inserting a precast concrete pile into a cement-mixing pile. As a new pile, although it is applied in practical engineering and its bearing capacity is higher than the design value, the microscopic study on stress characteristics of the pile is less, and the theory is not perfect yet. How to calculate the ratio of horizontal resistance coefficient of foundation soil with composite piles, there is no corresponding regulations and instructions in norms. To study the bearing capacity of the composite pile under lateral loading, the lateral loading tests on three composite piles are carried out. Through calculation and analysis it is explored how to calculate the ratio of horizontal resistance coefficient of foundation soil with composite piles. Experiments show that the design value of horizontal bearing capacity and the corresponding deformation should be used to calculate of the  $m$  value of the pile; Flexural rigidity of the pile  $EI$  can take algebraic sum of core pile and mixing pile. The  $m$  value of the pile is close to that of the filling pile in the Chinese Technical Code for Building Pile Foundations.

**Key words:** composite pile;  $m$  method; horizontal resistance

## 0 引言

软土具有低强度、高压缩性等特点, 为提高软土的承载力, 诸如注浆、深层水泥搅拌桩、静压桩、灌注桩等方法被采用, 这些方法有其各自的优点和缺点。深层搅拌和注浆的方法强度较低, 不适合中、高层建筑地基的处理; 而混凝土桩和灌注桩作为摩擦桩, 自身的高强度又不能充分发挥<sup>[1-3]</sup>。这样, 就需要寻求一

种既能提供足够高的竖向承载力, 又能充分发挥材料的强度性能的地基处理方法, 从而满足设计的竖向承载力和沉降要求。组合桩利用外侧壳体大的比表面积来提供摩阻力<sup>[4]</sup>, 同时又利用内部高强度的混凝土桩芯来承担上部荷载, 从理论上而言是一种经济、有效

的软土地基处理方法<sup>[5]</sup>。作为一种新型的桩, 其水平荷载作用下的受力性状是一个复杂的桩土相互作用过

表 1 土层物理力学指标统计参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

土层名称	层底深度 /m	含水率 w/%	孔隙比 e	压缩模量 $E_{S0.1-0.2}/\text{MPa}$	液性指数 $I_L$	黏聚力 $c_q/\text{kPa}$	内摩擦角 /( $^\circ$ )
黏土	3.10	32.4	0.920	4.48	0.52	32.5	9.9
粉质黏土	4.50	30.3	0.840	4.29	0.97	14.5	13.2
粉质黏土	8.50	30.6	0.860	4.28	0.81	14.0	13.8
粉质黏土	14.40	25.1	0.650	6.54	1.16	12.5	15.4
粉质黏土	16.50	26.6	0.730	4.27	0.77	17.5	7.4
粉质黏土	17.50	22.6	0.700	5.15	0.49	29.5	10.3
粉土	21.00	19.8	0.520	9.60	0.45	24.0	25.4

表 2 试验桩的具体参数

Table 2 Parameters of composite piles

桩号	外侧搅拌桩					芯桩			桩帽 /m
	直径 /m	长度 /m	水泥含量 /%	水灰比	搅拌次数	矩形截面 /m	长度 /m	混凝土抗压强度 /MPa	
#1	0.6	14.0	17.1	0.75	6	0.27	13.5	40.2	475
#2	0.6	14.0	17.1	0.85	6	0.27	13.5	40.2	475
#3	0.6	14.0	17.6	0.85	6	0.27	13.5	40.2	475

程<sup>[6]</sup>, 本文对组合桩计算时采用  $m$  法并与实验结果进行对比分析, 为今后同类地区水平受荷桩的设计与理论研究提供参考依据。

抗拉强度为零, 即弹簧只受压不受拉力, 可导得桩顶

## 1 试验概况

根据地质资料, 工程场地的土层的基本物理力学指标详见表 1, 地层钻孔柱状图详见图 1。试验的组合桩共三根, 具体参数详见表 2。桩的  $H-t-Y_0$  曲线如图 2~4 所示, 桩的  $H-\Delta Y/\Delta H$  曲线如图 5~7 所示。

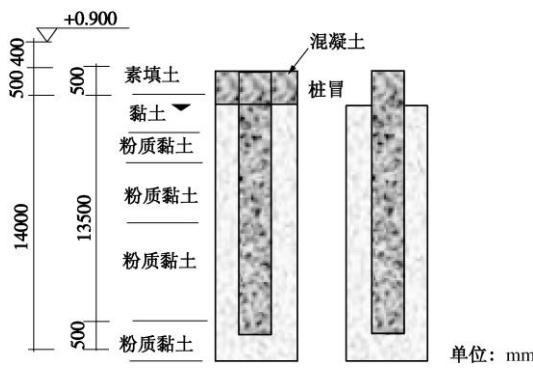


图 1 土层分布及组合桩的示意图

Fig. 1 Distribution of soil strata and illustration of piles

## 2 结果与分析

《建筑桩基技术规范》采用线弹性地基反力法(基床系数法)计算横向受荷桩的承载力和变位。该法的基本原理是: 假定桩侧土为 Winkler 离散线形弹簧, 假定的模型是一个独立工作的离散型弹簧所组成的弹性体。不考虑桩土之间的黏着力和摩阻力, 假定土的

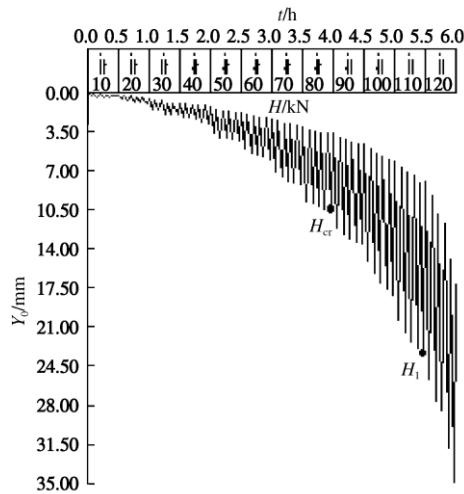
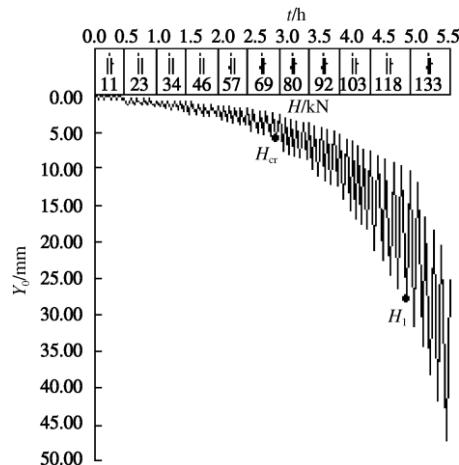
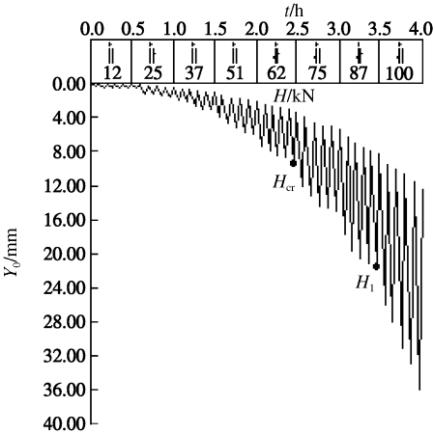
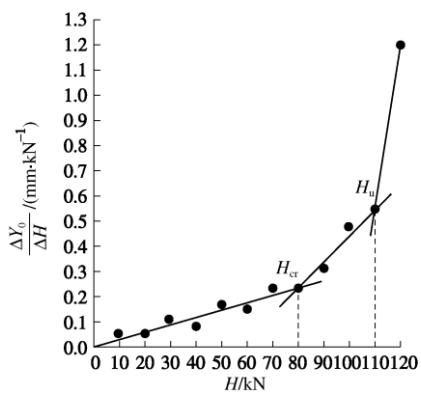
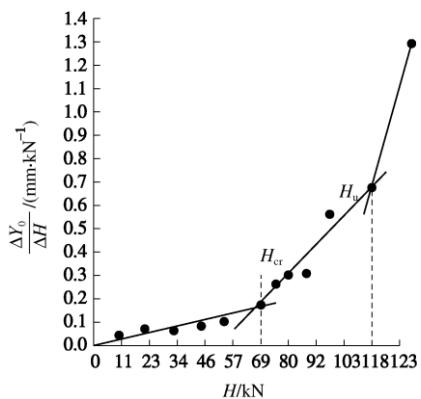
图 2 #1 桩的  $H-t-Y_0$  曲线Fig. 2  $H-t-Y_0$  curves of pile No. 1

图 3 #2 桩的  $H-t-Y_0$  曲线Fig. 3  $H-t-Y_0$  curves of pile No. 2图 4 #3 桩的  $H-t-Y_0$  曲线Fig. 4  $H-t-Y_0$  curves of pile No. 3图 5 #1 桩的  $H-\Delta Y/\Delta H$  曲线Fig. 5  $H-\Delta Y/\Delta H$  curves of pile No. 1图 6 #2 桩的  $H-\Delta Y/\Delta H$  曲线Fig. 6  $H-\Delta Y/\Delta H$  curves of pile No. 2

在横向荷载(剪力、弯矩)下的基本挠曲微分方程。本“规范”采用大量试验和工程实践表明较为符合实际的  $K(x)$  随深度线性增加的假定,  $K(x)=mx$ , 即  $m$  法, 其中  $m$  为地基土横向抗力系数随深度变化的比例系数。

$$\begin{cases} EI \frac{d^4 y}{dx^4} + b_0 p(x, y) = 0 \\ p(x, y) = m(x_0 + x)^i y^n = K(x) y^n \end{cases}, \quad (1)$$

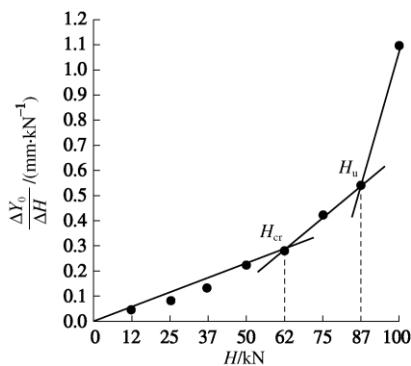
把  $p(x, y)=mxy$  代入式(1)得

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + mb_0 xy = 0. \quad (2)$$

令  $\alpha = \sqrt[5]{mb_0/EI}$ , 则(2)变为

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + \alpha^5 xy = 0. \quad (3)$$

其中  $\alpha$  称为桩的横向变形系数, 或称桩的变形特征,  $\alpha$  是地基土的  $m$  值、桩的计算宽度、桩的抗弯刚度  $EI$  的函数。

图 7 #3 桩的  $H-\Delta Y/\Delta H$  曲线Fig. 7  $H-\Delta Y/\Delta H$  curves of pile No. 3

当桩承受横向荷载时, 桩周土体起着稳定桩身和抵抗桩所传递的外力作用。线弹性基床系数法是把桩周土体看作弹性介质, 假定桩为支承在桩侧土体上的弹性梁, 用土抗力来表示土的弹性抗力性质。因此, 地基土横向抗力系数的比例系数  $m$  值不是一个独立的参数, 而是与土的性状、桩的弹性性质、直径、刚度及荷载大小等有关的综合参数。

$m$  的计算公式为

$$m = (H_{cr} \nu_x / y_{cr})^{5/3} / [b_0 (EI)^{2/3}]. \quad (4)$$

式中  $m$  为地基土水平抗力系数的比例系数, 该数值为地面以下  $2(d+1)m$  深度内各土层的综合值;  $H_{cr}$  为单桩水平临界荷载;  $y_{cr}$  为单桩水平临界荷载对应的位移;  $\nu_x$  为桩顶位移系数;  $b_0$  为桩身计算宽度 (m)。

圆形桩: 当桩径  $d \leq 1$  m 时,  $b_0=0.9(1.5d+0.5)$ ; 当桩径  $d \geq 1$  m 时,  $b_0=0.9(d+1)$ 。方形桩: 当边宽  $b \leq 1$  m 时,  $b_0=1.5b+0.5$ ; 当边宽  $b \geq 1$  m 时,  $b_0=b+1$ 。

《建筑桩基技术规范》中规定, 灌注桩由于配筋率低, 横向承载力多由桩身强度控制。桩的横向承载力设计值一般取横向临界荷载。因此, 这类桩的  $m$  值也应取临界荷载  $H_{cr}$  所对应的值。关于预制桩, 由于桩身强度高, 一般情况下水平承载力设计值由桩顶水平位移控制。考虑到以往的实际工程情况和经验, 取临界位移  $y_{cr}=10$  mm 比较合适。因此按上式计算时, 统一取  $y_{cr}=10$  mm,  $H_{cr}$  为试桩曲线  $H-t-Y_0$  中与 10

mm 对应的水平力数值。

因此, 对于组合桩, 要保证  $m$  取值状态与桩的实

际受力状态一致<sup>[7]</sup>, 应取水平承载力设计值  $R_h$  和与之

表 3 各桩临界荷载及相邻荷载等级下计算得到的  $m$  值表

Table 3 Critical loads and  $m$  values calculated by adjacent load

桩号	$H$	$y/\text{mm}$	$\alpha$	$M/(\text{MN m}^{-4})$	$H_u/\text{kN}$	$H_{\text{cr}}/H_u$
#1	62500(cr)	9.39	0.5	11.95	87	0.718
	75000	14.97	0.6	7.44		
#2	69000(cr)	5.80	0.3	31.46	118	0.585
	80000	8.63	0.4	20.76		
#3	70000	8.25	0.5	17.91	110	0.727
	80000(cr)	10.51	0.6	14.95		

注: 标记有 (cr) 的为临界荷载值。

表 4 《建筑桩基技术规范》中的  $m$  取值范围表

Table 4  $m$  values of Chinese Technical code for Building Pile Foundations

序号	地基土类别	预制桩、钢桩		灌注桩	
		$M/(\text{MN m}^{-4})$	相应单桩在地面处水平位移/mm	$M/(\text{MN m}^{-4})$	相应单桩在地面处水平位移/mm
1	淤泥, 淤泥质土, 饱和湿陷性黄土	2~4.5	10	2.5~6	6~12
2	流塑( $I_L > 1$ )、软塑( $0.75 < I_L \leq 1$ )状黏性土, $e > 0.9$ 粉土, 松散粉细砂, 松散、稍密填土	4.5~6.0	10	6~14	4~8
3	可塑( $0.25 < I_L \leq 0.75$ ) 状黏性土, $e = 0.75 \sim 0.9$ 粉土, 湿陷性黄土, 中密填土, 稍密细砂	6.0~10	10	14~35	3~6
4	硬塑( $0.25 < I_L \leq 0.75$ )、坚硬( $I_L \leq 0$ )状黏性土, 湿陷性黄土, $e < 0.75$ 粉土, 中密的中粗砂, 密实老填土	10~22	10	35~100	2~5
5	中密、密实的砾砂、碎石类土	—	—	100~300	1.5~3

对应的  $y$  来计算该组合桩的  $m$  值。

对于该劲性搅拌桩由于在临界荷载时该桩的水泥土仍能够和芯桩共同参与工作, 故取水泥土桩的外径作为该桩计算时的直径<sup>[8]</sup>, 而抗弯刚度  $EI$  取芯桩和搅拌桩的代数和, 其中芯桩的抗弯刚度( $EI$ )<sub>con</sub>= $17.6 \times 10^6 \text{ N m}^2$ , 而水泥土的抗弯刚度( $EI$ )<sub>cem</sub>= $0.59 \times 10^6 \text{ N m}^2$ , 则( $EI$ )<sub>cem</sub>/( $EI$ )<sub>con</sub>=3.36%, 可见水泥土的抗弯刚度对该桩的抗弯刚度的贡献很小。

现将各桩临界荷载及相邻荷载等级下计算得到的  $m$  值列于表 3。《建筑桩基技术规范》中的  $m$  取值范围如表 4 所示。

从表 3 中可见, 该桩的临界荷载对应的  $m$  值较分散。查表 4 中的对应于预制桩、钢桩的土层的  $m$  值, 计算得到该土层的  $\bar{m}=6.34 \text{ MN/m}^4$ , 可见试验得到的  $m$  值均大于该  $\bar{m}$ 。

若取芯桩宽度为该桩的计算桩宽, 则得到的  $m$  值将更大, 不合理。因此比较分析得, 该桩应取水泥土桩的外直径  $D$  作为计算  $m$  时的桩径  $D$ 。

3 根试桩的  $H_{\text{cr}}/H_u$  值均超过 50%, #1 和 #3 桩的值甚至达到了 70% 以上, 而对应的水平位移却较小, 不足 10 mm, 可见应取临界荷载作为该桩的水平承载力设计值, 而不应取 10 mm 水平位移对应的荷载值作为该桩的水平承载力设计值。为保证  $m$  取值与桩的实际受力状态一致, 应取临界荷载及对应的水平位移来计算  $m$  值。故 3 根试桩的  $m$  值分别为 11.95, 31.46, 14.95  $\text{MN/m}^4$ , 其平均值为 19.45  $\text{MN/m}^4$ 。#2 桩的  $m$  值与 3 根桩的  $m$  值的平均值的差大于该平均值的 30%, 其不符合统计规律; 故忽略 #2 桩, 取另外两根桩的平均值 13.45  $\text{MN/m}^4$  作为该类桩在此场地土的  $m$  取值, 该值是从《建筑桩基技术规范》中查到的对应

于预制桩、钢桩的该土层的  $\bar{m}=6.34 \text{ MN/m}^4$  的 2.12 倍, 而是从《建筑桩基技术规范》中查到的对应于灌注桩的该土层的  $\bar{m}=14.85 \text{ MN/m}^4$  的 0.91 倍, 可见与灌注桩的  $m$  值接近。

### 3 结 论

(1) 对于组合桩, 要保证  $m$  取值状态与桩的实际受力状态一致, 应取水平承载力设计值  $R_h$  和与之对应的  $y$  来计算该组合桩的  $m$  值。

(2) 可以采用  $m$  法近似计算组合桩的水平承载力, 计算时组合桩的抗弯刚度  $EI$  取芯桩和搅拌桩的代数和。

(3) 组合桩的  $m$  值与《建筑桩基技术规范》中查到的对应的灌注桩的  $m$  值比较接近。

### 参考文献:

- [1] MESRI G, CHOI Y K. Settlement analysis of embankments on soft clays[J]. J Geotech Engrg, ASCE, 1985, 111(4): 441 - 464.
- [2] LIN K Q, WONG I H. Use of deep cement mixing to reduce settlements at bridge approaches[J]. J Geotech and Geoenvr Engrg ASCE, 1999, 125(4): 309 - 320.
- [3] PING D, RAN Q, ZHENG Z C. Bearing capacity and settlement of concrete-cored DCM pile in soft ground[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2004, 22: 105 -

- 119.
- [4] 王 健, 夏明耀, 傅德明. H 型钢与水泥土搅拌桩围护结构的设计与计算[J]. 同济大学学报, 1998, 26(6): 636 - 639. (WANG Jian, XIA Ming-yao, FU De-ming. Design and calculation of composite structure with H-shaped steel and cemented-soil-pile[J]. Journal of Tongji University, 1998, 26(6): 636 - 639. (in Chinese))
- [5] 凌光容, 安海玉. 劲性搅拌桩的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(2): 92 - 96. (LING Guang-rong, AN Hai-yu. Experimental study on reinforced a mixing pile[J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(2): 92 - 96. (in Chinese))
- [6] 岳建伟, 凌光荣. 软土地基中组合桩水平受荷作用下的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 1 - 7. (YUE Jian-wei, LING Guang-rong. Test of composite piles under lateral loading in soft ground[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 1 - 7. (in Chinese))
- [7] 贾庆山. 桩基水平承载力标准值与  $m$  值的确定[J]. 地基处理, 1991, 2(4): 20 - 22. (JIA Qing-shan. Determine pile horizontal bearing capacity standard and  $m$  value[J]. Foundation Treatment, 1991, 2(4): 20 - 22. (in Chinese))
- [8] 柳博鹏, 凌光荣, 丁永君. 劲性搅拌桩在水平荷载下承载特性研究[J]. 低温建筑技术, 2006(1): 90 - 929. (LIU Bo-peng, LING Guang-rong, DING Yong-jun. Experimental study on the reinforced mixing pile respectively subjected to a lateral load[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2006(1): 90 - 929. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)